

不同发酵辅料下牛粪腐解过程温度和养分的变化规律

李忠徽¹, 王旭东^{1,2*}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为明确不同辅料对牛粪堆腐进程及养分转化的影响,向牛粪和秸秆的混合物料中分别添加尿素、油渣、豆饼和两种发酵剂进行堆肥发酵试验,监测发酵过程中堆体的温度,分析堆肥的酸度和氮、磷等养分的变化规律。结果表明:在堆肥过程中,发酵剂能够提高牛粪的堆腐温度,使堆体快速进入高温阶段,延长高温持续时间。随着堆肥的进行,产物的全氮含量增加,添加发酵剂尤其是自制的发酵剂,使氮素含量更高;降低了堆肥后期产物 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 的比值,使堆肥在第 21 d 达到腐熟标准($\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} \leq 0.5$)。添加发酵剂还促进堆肥后期无机磷向有机磷转化,提高了有机磷/无机磷的比值。从保氮和腐熟综合考虑,添加不同辅料对牛粪的腐熟效果为自制发酵剂>商品发酵剂>豆饼>油渣>尿素。

关键词:牛粪;辅料;发酵剂;堆肥;温度;养分

中图分类号:S141.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)03-0471-07 doi:10.11654/jaes.2014.03.010

Changes of Temperature and Nutrients in Cow Dung with Different Amendments During Composting Process

LI Zhong-hui¹, WANG Xu-dong^{1,2*}

(1.College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract:Composting cow dung is an effective way to dispose the wastes. However, different amendments greatly affect nutrient transformations during composting process. In this experiment, urea, oil residue, bean cake and two types of fermentation agents were added to the mixture of cow dung and straw materials to examine changes in temperature, acidity of compost product and contents of nitrogen and phosphorus. Additions of fermentation agents could increase temperature of cow dung compost, bringing the compost to high temperature phase quickly and extending the high-temperature duration. Composting increased total nitrogen contents. Adding our own developed fermentation agents led to greater nitrogen contents, but reduced the ratios of NH_4^+-N to NO_3^--N , thus having the compost matured in 21 days ($\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} \leq 0.5$). In addition, the fermentation agents also promoted the transformation of inorganic into organic phosphorus and improved the ratio of organic phosphorus to inorganic phosphorus of the compost products. Considering both nitrogen conservation and compost maturity, different amendments were in order of our fermentation agents>commercial fermentation agents>bean cakes>oil residues>urea.

Keywords:cow dung; fermentation agent; amendments; compost; temperature; nutrients

随着我国奶牛养殖业的集约化、规模化发展,大量牛粪如何处理的问题日益凸显,亟待解决,如不合理处理,不仅会严重污染环境,而且极大地浪费了资源。但若畜禽粪便不经处理直接施用或过量施用,则会造成水体、土壤、大气污染^[1-4],同时因粪便自身带有大量病原菌或其他有机污染物和重金属等会抑制植

物生长,促使植物病害发生^[5-6]。所以,把牛粪通过堆肥化腐解后再利用是解决以上问题的一种有效途径。牛粪中有机质丰富,含有较高的 N、P、K 及微量元素,是很好的有机肥原料,经过腐熟还田后,能起到化肥不可替代的作用:有利于提高土壤有机质和肥力,改良土壤结构,改善土壤理化环境和微生物环境^[7]。但是传统的堆肥方法是利用原料中的土著微生物来降解有机物质,堆肥初期有益微生物少,需要一定时间才能繁殖起来,往往存在发酵时间长、易产生臭味、处理工艺落后、劳动强度大、腐熟得到的成品肥效低、养料价值不高等缺点,已不适合现代农业的发展需要^[8]。特别

收稿日期:2013-11-11

基金项目:“十二五”国家科技支撑项目(2012BAD14B11);陕西省科技统筹创新工程计划课题(2011KTDZ02-01-04)

作者简介:李忠徽(1987—),男,四川苍溪人,硕士研究生,主要从事有机肥研究。E-mail:lizhonghui1011@126.com

* 通信作者:王旭东 E-mail:wangxudong01@126.com

是牛粪属于冷性肥料,发热量小、腐熟缓慢^[9],传统堆肥方式更加不能满足其腐解要求,所以在牛粪中添加适宜辅料以及利用发酵剂可以加速堆肥基质的降解,有效地提高堆肥温度、加快腐熟进程^[10]。本试验以牛粪和小麦秸秆为原料,通过添加不同发酵剂进行堆肥发酵,研究在不同辅料作用下牛粪堆肥化过程中的温度、pH 以及氮、磷养分的变化规律,期望明确各辅料对牛粪堆肥进程的影响,为粪便的无害化处理和堆肥生产提供理论和技术指导^[11]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验牛粪取自杨凌奶牛养殖场,秸秆为小麦秸秆经晒干切碎后使用,发酵剂①为市场购买的商品发酵剂(有效菌数达到 20 亿·g⁻¹),发酵剂②为从牛粪堆肥中筛选制备的混合发酵剂(内含能高效分解纤维素的真菌,有效菌数达到 20 亿·g⁻¹),尿素、油渣、豆饼均由市场购买。供试材料的基本性质见表 1。

表 1 供试堆肥材料的基本性质

Table 1 Basic properties of compost materials

原料	pH	含水量/%	全 N/ g·kg ⁻¹	全 P/ g·kg ⁻¹	有机磷/ g·kg ⁻¹	全 K/ g·kg ⁻¹
牛粪	7.38	20.5	18.2	4.11	2.45	6.05
小麦秸秆	7.02	11.3	4.2	0.77	0.36	7.92
油渣	5.27	7.49	60.7	13.00	3.90	12.9
豆饼	5.04	10.0	72.0	6.50	1.95	20.00

1.2 试验设计

试验根据 5 种不同的处理配方(表 2),往牛粪和秸秆中加入尿素、油渣、豆饼和发酵剂后进行堆肥发酵。各处理的初始含水率调节为 60%左右,然后把物料加入塑料桶(100 L)并插入温度计开始发酵,发酵开始时每天搅拌通风 1 次,当温度下降到 35 ℃以后每 3 d 搅拌通风 1 次,然后继续加盖发酵^[12]。在发酵过程中每天两次读取温度,从第 1 d 开始每 2 d 测定 1 次挥发性氨,并分别于发酵的第 0、7、14、21 d 采取中心样,一部分鲜样用于酸度以及硝铵态氮测定,另一部分鲜样风干、备用。

1.3 测定项目与方法

样品用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮测定全氮和全磷^[13],全氮用流动分析仪测定,全磷用钒钼黄比色法测定,铵态氮和硝态氮用 2 mol·L⁻¹ KCl 浸提后用流动分析仪测定^[13],有机磷用灼烧法测定^[13],全磷与有机磷的差

表 2 不同处理及配方

Table 2 Formula for different treatments

处理	发酵主料	初始温度/℃
处理 1	牛粪 21.0 kg+秸秆 0.9 kg+尿素 0.2 kg	15.9
处理 2	牛粪 21.0 kg+秸秆 0.9 kg+油渣 0.2 kg	17.5
处理 3	牛粪 21.0 kg+秸秆 0.9 kg+豆饼 0.2 kg	18.2
处理 4	牛粪 21.0 kg+秸秆 0.9 kg+油渣 0.2 kg+发酵剂①	20.4
处理 5	牛粪 21.0 kg+秸秆 0.9 kg+油渣 0.2 kg+发酵剂②	20.1

注:发酵剂①和发酵剂②的加入量占有有机物料(牛粪+秸秆)的 0.2%。

值为无机磷,挥发性氨用硼酸吸收,标准酸滴定法测定^[9]。

1.4 数据处理

实验数据采用 Microsoft Excel 2003 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度的变化

堆肥的温度变化是微生物活动的重要指标^[14],能够反映堆肥的腐熟进程。在牛粪中加入不同辅料后,各处理的堆肥先后经历了升温期、高温期、降温期和腐熟期(图 1)。各处理的起始温度平均在 18 ℃左右,但从第 1 d 开始堆肥进入快速升温阶段。牛粪加油渣的堆体温度于第 4 d 进入高温阶段(50 ℃),并达到最高温度 53 ℃,维持高温 1 d;牛粪加尿素、豆饼的堆体温度一直未达到 50 ℃,仅在第 4 d 达到最高温度,分别为 45.7 ℃和 49.6 ℃;牛粪加发酵剂①、发酵剂②的两个处理堆体温度较其他 3 个处理提前 1 d 进入高温阶段,亦提前 1 d 达到最高温度,分别为 62.5 ℃和 64.5 ℃,维持高温 4 d,而且发酵剂②比发酵剂①在高温阶段温度高出 2 ℃左右。高温阶段不同处理温度的高低顺序是牛粪加发酵剂②>发酵剂①>油渣>豆饼>

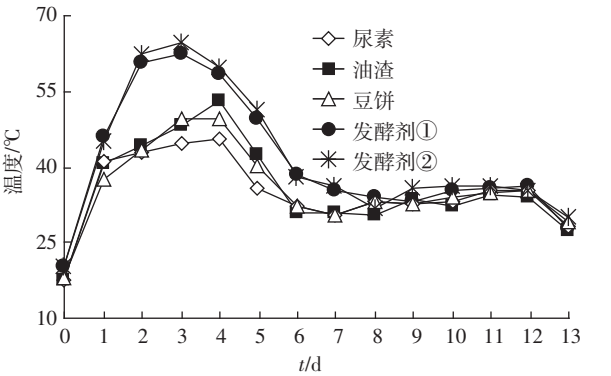


图 1 堆肥化过程中的温度变化

Figure 1 Changes of temperature during composting process

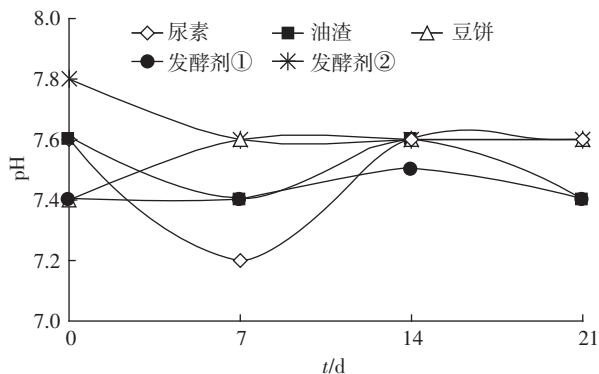


图2 堆肥化过程中的 pH 变化

Figure 2 Changes of pH during composting process

尿素。说明从两种发酵剂看,发酵剂②更好;从3种辅料看,油渣更好。

2.2 堆肥过程中 pH 的变化

pH 的变化是反映堆肥过程的重要参数(图2)。在堆肥初期由于有机物厌氧发酵产生的有机酸的积累,牛粪加尿素、油渣、发酵剂①和发酵剂②的 pH 降低,但牛粪加豆饼的 pH 在堆制初期不仅没有下降反而呈上升趋势,其原因可能是因为豆饼中含有大量蛋白质,堆肥过程中蛋白质降解产生氨气所导致。而后随着有机酸的分解与氨氮的产生各堆体 pH 开始上升,堆制后期由于硝化作用和氨氮的挥发致使 pH 又逐渐回落。在整个堆肥过程中各处理 pH 在 7.2~7.8 的范围内变化,最大变幅仅为 0.4,均满足最适宜微生物活动的中性或弱碱性环境和 NY 525—2012 中规定的有机肥料酸碱度标准(5.5~8.0)^[15]。发酵 21 d 时,各处理之间差异不显著。

2.3 堆肥过程中全氮的变化

堆肥过程中各处理全氮总体上呈现出增加的趋势,但是因为在堆肥前期经历了升温期,高温加快了挥发性氮的损失,所以前 7 d 部分处理全氮含量有所下降(图3)。堆肥结束时,各处理的全氮含量表现为牛粪加发酵剂②>发酵剂①>尿素>豆饼>油渣。牛粪加尿素、油渣、豆饼、发酵剂①和发酵剂②处理的全氮分别增加了 15.8%、10.9%、22.2%、22.0%和 22.4%,这是因为在堆肥过程中有机质不断分解成 CO₂ 和水而散失,由总干物质重量下降引起的氮素含量增加幅度大于由氮素损失所引起的氮素含量下降的幅度,最终使干物质中全氮的相对含量增加。添加自制的发酵剂②比市场购买的发酵剂①更有利于提高堆肥产物的氮素含量,而在尿素、油饼、豆渣3种辅料中,豆饼相对有利于提高堆肥产物的含氮量。在发酵过程中添加

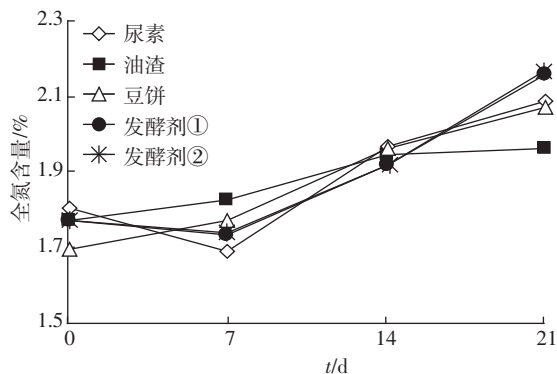


图3 不同处理全氮含量的变化

Figure 3 Changes of total N contents in composts in different treatments

尿素并没有提高堆肥产物的含氮量,大量的氮素被挥发掉,这也是生产中在用尿素调节 C/N 时,经常会产生大量的氨刺激性气味的原因。

2.4 堆肥过程中挥发性氮的变化

堆肥化过程中各处理 NH₃ 的释放量均表现出先增加后减少的趋势(图4)。牛粪加尿素在第 3 d 达到最大值 3.76 g·kg⁻¹·d⁻¹,牛粪加油渣和豆饼都在第 7 d 达到最大值 1.95 g·kg⁻¹·d⁻¹,牛粪加发酵剂①和发酵剂②在第 5 d 达到最大值分别为 4.58、2.37 g·kg⁻¹·d⁻¹。这是由于堆肥初始有机质含量丰富,且温度适宜大多数氨化细菌生长,进入高温期后,部分氨化细菌因温度过高死亡,堆肥后期,物料中有机质减少,氨化细菌数量趋于稳定^[16]。总体看来,添加尿素、发酵剂①的两个处理挥发性氮的含量高,而添加发酵剂②、豆饼、油渣的处理挥发性氮的含量相对较低。这一方面说明在用尿素调节有机物料的发酵腐解时,容易产生氨的挥发,与前面氮素含量变化相对应;另一方面也说明,不同发酵剂,在提高温度促进有机物料发酵腐解的同

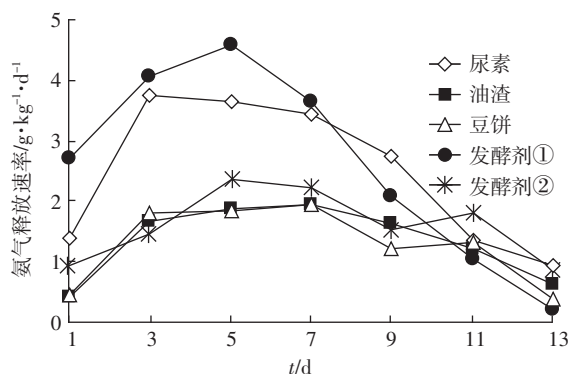


图4 不同处理挥发性氨释放速率的变化

Figure 4 Changes of volatile ammonia in composts in different treatments

时,其保氮作用大小不同,有的发酵菌剂保氮作用较强,而有的则相对较弱,在促进有机碳矿化的同时,氮素的损失也较多。采用豆饼、油渣等发酵辅料时,虽然发酵温度没有添加微生物菌剂的高,但具有氮素挥发损失较少的特点。

2.5 堆肥过程中 NH_4^+-N 的变化

NH_4^+-N 的变化主要取决于温度、pH 和堆肥中氨化细菌的活性^[17]。在堆肥初期,由于含氮有机物的大量降解以及 pH 的降低,导致 NH_4^+-N 含量增加^[18];在堆肥中后期因为可降解氮素的减少、 NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N 或挥发损失等,导致各处理的 NH_4^+-N 含量呈明显下降趋势^[19];至堆肥后期随着温度降低腐殖化作用增强, NH_4^+-N 含量降低并趋于稳定^[20]。从处理 1 到处理 5, 发酵过程中 NH_4^+-N 的平均含量分别为 373.90、373.27、311.91、369.32 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 306.43 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表现出牛粪加尿素>油渣>发酵剂①>豆饼>发酵剂②的大小顺序(图 5)。腐解 21 d 时,加尿素的堆肥中 NH_4^+-N 下降幅度最大;加油渣的堆肥中 NH_4^+-N 的下降幅度比豆饼的小;两种发酵剂相比,前期(14 d 以前)添加发酵剂①的 NH_4^+-N 含量比添加发酵剂②平均高 24.6%。和发酵初期相比,在整个堆肥过程中牛粪添加尿素、油渣、豆饼、发酵剂①和发酵剂②,各处理的 NH_4^+-N 分别减少了 75.6%、45.9%、56.4%、59.7% 和 58.2%。

2.6 堆肥过程中 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 比值的变化

堆肥中 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 比值呈现出先升高后降低的趋势(图 6)。在堆肥初期,由于堆体中铵态氮含量增加,同时高温降低了硝化细菌的活性从而抑制了 NO_3^--N 的产生,所以导致 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 的比值呈现出上升的趋势。随后,因为堆体中温度降低,硝化细菌快速生长繁殖,将 NH_4^+-N 转化成 NO_3^--N ,使 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 的比值呈现出快速降低的趋势^[19,21]。其中处理

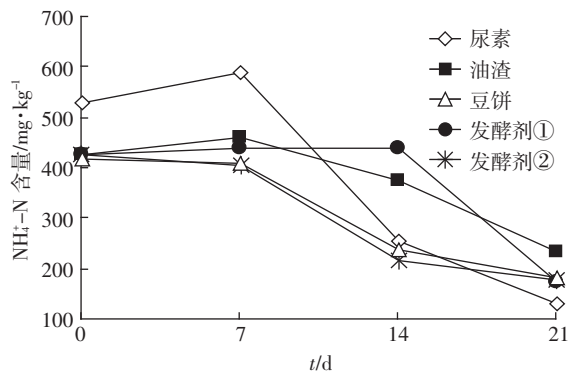


图 5 不同处理 NH_4^+-N 的变化

Figure 5 Changes of NH_4^+-N in composts in different treatments

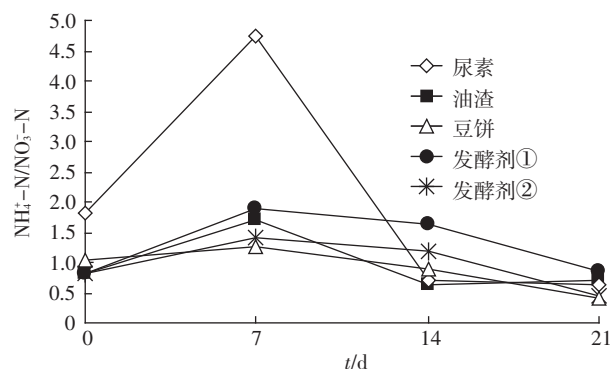


图 6 不同处理 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 比值的变化

Figure 6 Changes of ratios of $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ in composts in different treatments

1 在堆肥前期 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 比值大幅高于其他处理,其原因是尿素大量水解转化为碳铵所致。腐解 21 d 时,牛粪加尿素、油渣、豆饼、发酵剂①和发酵剂②的处理中 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 的比值分别为 0.62、0.69、0.40、0.84 和 0.46,根据加拿大政府有关堆肥标准,当 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N} \leq 0.5$ 时堆肥腐熟,则在 21 d 的堆肥过程中仅添加发酵剂②或豆饼的两个处理达到腐熟标准,发酵剂①的处理没有达到腐熟标准。说明不同发酵剂对堆肥化过程 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的转化存在差异。

2.7 堆肥过程中全 P 的变化

堆肥前后各处理全 P 含量都有所增加(图 7)。堆肥结束时,从处理 1 到处理 5 的全 P 含量分别比堆肥初期增加 10.0%、22.2%、31.4%、36.4% 和 29.1%,相对而言,添加豆饼和两种添加发酵剂的处理全 P 含量相对较高。尽管发酵过程中磷存在形态间的相互转化,但在发酵罐中不存在损失,所以全 P 含量随着堆肥化进程的上升幅度反映了不同处理腐解的快慢^[19]。结果表明,向牛粪中添加发酵剂或豆饼比添加油渣和尿素更能提高牛粪的腐熟速度。

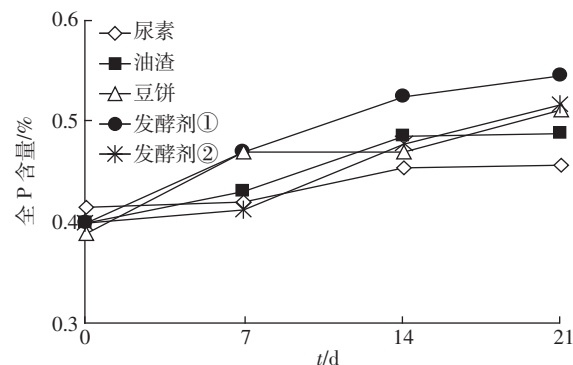


图 7 不同处理全 P 的变化

Figure 7 Changes of P contents in composts in different treatments

2.8 堆肥过程中有机磷/无机磷的变化

在堆肥过程中有机磷占全磷的比例呈上升趋势(图8、图9),到堆肥结束时,有机磷较堆肥初始时高出1.2~1.5倍,大小顺序为牛粪加发酵剂①>发酵剂②>豆饼>油渣>尿素,说明在牛粪腐解过程中加入发酵剂和豆饼可以促进有机磷的形成。

在整个堆肥过程中有机磷/无机磷比值大于1(图10),但随着腐解进程呈现一定的波动变化,而且由于各处理的配方不同,有机磷/无机磷比值变化有所差异:牛粪添加发酵剂②、尿素两个处理在腐解14 d时达到最高值,14 d以后有所下降,而添加发酵剂①总体呈上升趋势。到腐解21 d时,各处理的有机磷/无机磷比值的大小顺序为牛粪加发酵剂①=发酵剂②>油渣>尿素>豆饼,说明,两种发酵剂更有利于无机磷向有机磷的转化;从油渣、尿素、豆饼3种辅料来看,油渣更有利于无机磷向有机磷的转化。

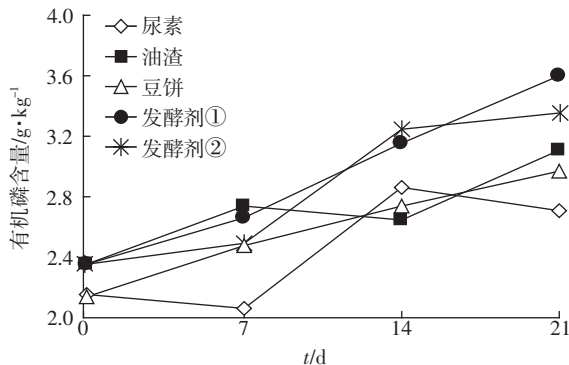


图8 不同处理有机磷变化

Figure 8 Changes of organic P contents in composts in different treatments

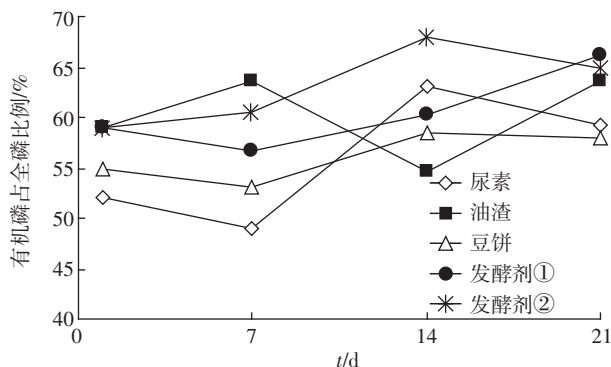


图9 不同处理有机磷占全磷的比例

Figure 9 Ratios of organic P to TP in composts in different treatments

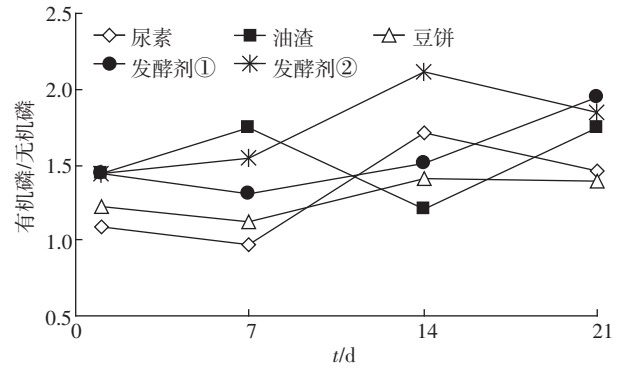


图10 不同处理有机磷/无机磷比值的变化

Figure 10 Ratios of organic P to inorganic P in composts in different treatments

3 讨论

牛粪属于冷性粪便,不易起温、腐熟^[22]。通过物料调配和发酵剂的应用,建立牛粪的快速堆肥化技术是需要解决的问题。在本研究中发现,牛粪添加发酵剂的处理能够促进堆肥快速进入高温期,提高温度,维持高温阶段持续较长的时间(和添加尿素、油渣和豆饼的处理相比),在堆腐21 d左右达到《粪便无害化卫生标准》^[21],整个腐解过程腐解物料也符合《有机肥料酸碱度标准》(5.5~8.0)^[15]。而向牛粪中仅添加秸秆、尿素、油渣和豆饼等物料在短期内(21 d)并不能很好地完成腐熟,需要较长时间的堆腐处理。说明微生物发酵剂的应用具有促进牛粪腐熟的效果。

氮素在堆肥化过程中的转化包括固定和释放两个方面。氮素的固定主要源于微生物的利用,最终成为堆肥腐殖质的一部分;氮素的释放包括氮素的矿化、氨气的挥发、硝化及反硝化作用,其中氨气挥发和反硝化作用直接导致氮素的损失^[17]。本次试验结果表明,堆肥前后氮素的相对含量增加,这与黄懿梅等^[17]、卢秉林等^[19]的研究结果一致;且添加发酵剂②比发酵剂①、豆饼比油渣和尿素更有利于提高堆肥产物中的氮素含量。同时,根据氨气的挥发量可以看出发酵剂②、豆饼和油渣更有利于氮素的保存,这与氮素含量变化相对应。总体看来,添加发酵剂②更有利于牛粪的堆腐发酵。牛粪纤维素含量高、难以降解^[23-24],而发酵剂②是从养牛场的牛粪长期堆放场中筛选的含有大量分解纤维素的真菌构成。因此,具有更好地促进牛粪腐熟的效果。至于豆饼也表现出一定的促进作用,可能与豆饼的含氮量相对较高有关,其机理有待进一步深入。磷素由于不存在挥发损失,在堆肥化过程中其含量由于堆肥质量减少而得到浓缩。同时无机

磷和有机磷之间又相互转化:一方面有机物料中的磷素经过矿物转化为无机磷;另一方面,无机磷被微生物吸收固定或与新形成的腐殖物质结合转化为有机磷。从有机磷/无机磷的比值看,牛粪中添加两种发酵剂以及油渣都更有利于促进无机磷向有机磷的转化。说明堆肥化过程中加入微生物菌剂,在促进有机碳矿化的同时,在一定时段还可以促进无机磷的微生物固定或腐殖质固定,转化为有机磷。有机磷在土壤中受到的固持作用相对较弱(和无机磷相比),其有效性总体相对较高。因此,这种转化对提高磷素有效性具有一定的积极作用。从发酵温度和养分转化综合考虑,不同辅料对牛粪的腐熟效果为发酵剂②>发酵剂①>豆饼>油渣>尿素。说明对于牛粪等相对难分解的农业废弃物,在堆肥化过程中添加适宜的发酵剂不仅能促进腐熟,而且有利于对氮、磷养分的保存和转化。

4 结论

(1)添加发酵剂可有效促进牛粪堆体提前进入高温阶段、提高发酵温度并延长高温阶段时间,有利于堆料腐熟。

(2)向牛粪中添加豆饼、油渣和自制发酵剂相对于商品发酵剂和尿素,有效减少了氮素损失,保氮效果更优;添加发酵剂和油渣,更能有效促进发酵后期无机磷向有机磷的转化。

(3)堆肥过程中,不同辅料对牛粪的腐熟效果为自制发酵剂>商品发酵剂>豆饼>油渣>尿素。

参考文献:

- [1] 彭奎,朱波.试论农业养分的非点源污染与管理[J].环境保护,2001(1):15-17.
PENG Kui, ZHU Bo. Discussion on no-point pollution and management of agricultural nutrients[J]. *Environmental Protection*, 2001(1):15-17.
- [2] 徐应明.畜禽养殖行业废水排放标准的研究[J].上海环境科学,1995,14(2):34-36.
XU Ying-ming. Study of discharge standards on excrement of livestock and poultry farms[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 1995, 14(2):34-36.
- [3] 朱文转,李传红.南方农村集约化养殖场污染及其防治[J].重庆环境科学,1999,21(6):33-35.
ZHU Wen-zhuan, LI Chuan-hong. Pollution and control measurements of intensive farm of pig raising in southern rural area [J]. *Chongqing Environmental Science*, 1999, 21(6):33-35.
- [4] 刘红.养猪场对环境的污染改善对策及处理利用技术[J].农业环境保护,2000,19(2):101-103.
LIU Hong. Environment contamination, origination and remedy technique in pig farm[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(2):101-103.
- [5] 高定,陈同斌,刘斌,等.我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J].地理研究,2006,25(6):311-319.
GAO Ding, CHEN Tong-bin, LIU Bin, et al. Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(6):311-319.
- [6] Hoitink H A J, Boehm M J. Biocontrol within the context of soil microbial communities: A substrate-dependent phenomenon[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 1999, 37:427-446.
- [7] 袁立,王占哲,刘春龙.国内外牛粪生物质资源利用的现状与趋势[J].中国奶牛,2011,5:3-9.
YU Li, WANG Zhan-zhe, LIU Chun-long. Current situation and trend of dairy manure biomass resources at home and abroad[J]. *China Dairy Cattle*, 2011, 5:3-9.
- [8] 徐璠,关静姝,栾冬梅.秸秆不同细碎程度对牛粪好氧堆肥化过程的影响[J].东北农业大学学报,2008,39(2):217-221.
XU Jin, GUAN Jing-shu, LUAN Dong-mei. Effect of different granularities of corn stock on cattle manure aerobic co-composting[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2008, 39(2):217-221.
- [9] 马丽红,黄懿梅,李学章,等.两种添加剂对牛粪堆肥中氮转化及相关微生物的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):76-82.
MA Li-hong, HUANG Yi-mei, LI Xue-zhang, et al. Response of the spectral reflectance to total N and NO₃-N of winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1):76-82.
- [10] 解开治,徐培智,张仁陟,等.一种腐熟促进剂配合微生物腐熟剂对鲜牛粪堆肥的效应研究[J].农业环境科学学报,2007,26(3):1142-1146.
XIE Kai-zhi, XU Pei-zhi, ZHANG Ren-zhi, et al. Effects of one chemical composting promoter and microorganism composting preparations on fresh cow dung compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):1142-1146.
- [11] 邓伟,陈文浩,王彦杰,等.接菌剂对牛粪堆肥化过程中主要成分含量的影响[J].黑龙江八一农垦大学学报,2010,22(6):15-18.
DENG Wei, CHEN Wen-hao, WANG Yan-jie, et al. Effects of inoculants on the content of the major components in the composting process [J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2010, 22(6):15-18.
- [12] 赵洪颜,李杰,刘晶晶,等.沼液堆肥和牛粪堆肥发酵过程中酶活性及理化指标变化的差异[J].中国农业大学学报,2013,18(2):153-157.
ZHAO Hong-yan, LI Jie, LIU Jing-jing, et al. Differences of enzyme activities and physicochemical indexes in biogas slurry compost and cattle manure compost[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(2):153-157.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].三版.北京:中国农业出版社,2000.
BAO Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. Third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [14] Brito L M, Coutinho J, Smith S R. Methods to improve the composting process of the solid fraction of dairy cattle slurry[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99, 8955-8960.
- [15] 中华人民共和国农业部. NY 525—2012 有机肥料[S].北京:中国农

- 业出版社, 2012.
- The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY 525—2012. Organic manure[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.
- [16] 齐婧媛, 徐凤花, 郭梅仙, 等. 除氨菌系对牛粪堆肥氮素转化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(2): 73–77.
- QI Jing-yuan, XU Feng-hua, GUO Mei-xian, et al. Ammonia removal microorganism's effects on nitrogen transformation of cattle manure composting[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(2): 73–77.
- [17] 黄懿梅, 苟春林, 梁军峰. 两种添加剂对牛粪秸秆堆肥化中氮素损失的控制效果探讨[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1219–1225.
- HUANG Yi-mei, GOU Chun-lin, LIANG Jun-feng. Effect of two amendments on nitrogen loss from composting of cattle manure and corn straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 1219–1225.
- [18] Kirchmann H, Witter E. Ammonia volatilization during aerobic and anaerobic manure decomposition[J]. *Plant and Soil*, 1989, 115: 35–41.
- [19] 卢秉林, 王文丽, 李 娟, 等. 牛粪与小麦秸秆混合高温堆肥的腐熟进程研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(1): 30–34.
- LU Bing-lin, WANG Wen-li, LI Juan, et al. Maturing process of cattle manure high temperature composting with mixing different ratio of wheat straw[J]. *Environment Pollution & Control*, 2010, 32(1): 30–34.
- [20] 李玉红, 王 岩, 李清凤, 等. 外源微生物对牛粪高温堆肥的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 609–612.
- LI Yu-hong, WANG Yan, LI Qing-feng, et al. Effect of inoculating microbes on composting process of cattle manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 609–612.
- [21] GB 7959—1987 粪便无害化卫生标准[S].
- GB 7959—1987 Feces harmless hygiene standards[S].
- [22] 赵明梅, 牛明芬, 何随成, 等. 不同微生物菌剂对牛粪堆肥发酵影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(Suppl2): 587–590.
- ZHAO Ming-mei, NIU Ming-fen, HE Sui-cheng, et al. Effects of inoculating different microorganism agents on composting of cow manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl2): 587–590.
- [23] 赵洪颜, 李 杰, 刘晶晶, 等. 沼液堆肥化与牛粪堆肥化的发酵特性及腐熟进程[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2272–2276.
- ZHAO Hong-yan, LI Jie, LIU Jing-jing, et al. Fermentation process and maturation characteristics for biogas slurry and cattle manure compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2272–2276.
- [24] 方华舟, 王培清. 牛粪堆肥各阶段主要纤维素降解菌分离与作用规律分析[J]. 中国土壤与肥料, 2012(6): 88–92.
- FANG Hua-zhou, WANG Pei-qing. Cellulose degradation bacteria separation and action rule analysis of cow dung compost in various stages[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(6): 88–92.